doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.014

纵轴流辊式组合玉米柔性脱粒分离装置设计与试验

陈美舟　徐广飞　王传旭　刁培松　张银平　牛国栋

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

摘要: 为满足黄淮海地区较高含水率玉米籽粒直收作业要求,解决现有籽粒收获机籽粒破碎率和未脱净率高、玉米芯轴苞叶易堵塞凹板等问题,在分析现有脱粒装置结构特点的基础上,设计了一种"柔性钉齿 + 双扭簧压力短纹杆"组合式脱粒元件和"六棱孔网格筛 + 鱼鳞式脱粒橡胶辊"组合式脱粒凹板相配合的柔性脱粒分离装置。对关键部件进行理论分析,确定了影响脱粒性能的主要因素,利用搭建的纵轴流辊式组合玉米柔性脱粒试验台进行单因素试验,得到脱粒性能较好时滚筒转速、辊筒传动比以及脱粒间隙的变化范围。以滚筒转速、辊筒传动比和脱粒间隙为试验因素,以籽粒破碎率、未脱净率为指标进行三因素三水平正交试验。结果表明,对籽粒破碎率和未脱净率影响由大到小均为滚筒转速、辊筒传动比、脱粒间隙;最优参数组合为滚筒转速 475 r/min、辊筒传动比 1.5、脱粒间隙 45 mm,此时籽粒破碎率为 3.76%,未脱净率为 0.52%。对该组合进行试验验证,各指标符合国家相关标准要求。

关键词: 玉米; 脱粒分离装置; 籽粒直收型; 纵轴流

中图分类号: S226.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)10-0123-09　　**OSID**:

Design and Experiment of Roller-type Combined Longitudinal Axial Flow Flexible Threshing and Separating Device for Corn

CHEN Meizhou　XU Guangfei　WANG Chuanxu　DIAO Peisong　ZHANG Yinping　NIU Guodong

(*School of Agricultural Engineering and Food Science*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255049, *China*)

Abstract: Corn grain harvesting has become the development trend of corn harvest in China. However, the grain harvesting mechanization is still backward in Huang - Huai - Hai region for the wheat-corn rotation planting pattern. The grain moisture content of corn is about 30% when harvesting. Its low level of the existing grain harvester is unable to meet the requirement of corn grain harvesting with higher moisture content. The broken grains for mechanical threshing are prone to mildew which even threaten food security. The high breaking rate and high un-threshing rate of the traditional threshing and separating device in Huang - Huai - Hai region have been the choke points of grain harvesting development. In order to solve these problems, the longitudinal axial flow flexible threshing and separating device was designed with the combined threshing element and roller-type combined threshing concave. The roller-type combined threshing concave with six-edged mesh sieve and fish scale threshing rubber roller was designed with different traditional concave plate. To verify the feasibility of low damage harvesting, the test device was built and the working mechanism was introduced in detail. Based on the theoretical analysis of the structure, three parameters, i.e. cylinder speed, transmission ratio between roller and cylinder and threshing clearance were chosen as the influence factors of test experiment. And the breaking rate and un-threshed rate could represent the threshing and separating performance. Reasonable variation rage of various factors was determined through single factor experiment. On this basis, three-factor and three-level orthogonal experiment was carried out. The results showed that the

收稿日期: 2020-07-14　修回日期: 2020-08-13

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2018CXGC2015)、国家重点研发计划项目(2018YFD03006)、中国博士后科学基金项目(2018M642685)、山东省现代农业产业体系玉米创新团队机械加工岗位专家项目和山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ005)

作者简介: 陈美舟(1989—),女,博士生,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail: chenfeng2830@163.com

通信作者: 刁培松(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail: dps2003@163.com

order of influence factors on the breaking rate and un-threshed rate was both cylinder speed, transmission ratio between roller and cylinder and threshing clearance. The optimal conditions were as below: the cylinder speed was 475 r/min, the transmission ratio between roller and cylinder was 1.5 and the threshing clearance was 45 mm. Under the above conditions, the breaking rate was 3.76% and the un-threshed rate was 0.52%. The verification test showed that this device had good threshing and separating performance, which can meet the requirement of the national standards in China. The research results can provide the references for low damage corn grain harvesting technology.

Key words: corn; threshing and separating device; type of direct grain; vertical axial flow

0 引言

脱粒分离装置是籽粒收获机的核心工作部件,脱粒性能对整机作业性能有显著影响[1]。现有脱粒分离装置主要利用脱粒元件对果穗的刚性冲击、挤压以及与凹板的挤搓作用完成脱粒,极易造成籽粒破碎、破皮或裂纹等问题,籽粒含水率较高时尤为严重,且苞叶、芯轴等杂余易堵塞凹板,降低了收获效率与收获质量[2-4]。籽粒含水率较高时,因机械脱粒损伤的籽粒易发生霉变和虫害,不利于籽粒贮藏,甚至威胁粮食安全[5]。因此,高含水率果穗籽粒直收的高破碎率问题一直是制约我国玉米全程机械化发展的重要因素,在小麦-玉米两茬轮作的黄淮海地区更为突出。黄淮海地区夏播玉米收获时籽粒含水率一般在 30% ~35% 之间,不利于籽粒收获,因此多数地区仍以果穗收获为主[6-7]。研究表明,在 10 月下旬甚至更晚夏玉米才能达到适宜籽粒直收的含水率小于 25% 的要求,但会延迟冬小麦的播种。若适当晚收,在籽粒含水率降至较高水平(26% ~28%)时收割,则既不影响农时,又可促进增产增收[8]。

国外对于玉米机械脱粒损伤和破碎的研究主要集中在不同因素或玉米本身的力学特性对脱粒过程的影响方面。DUANE 等[9]探索了脱粒速度、含水率等因素对玉米脱粒过程籽粒损伤的影响,BURKHARDT 等[10]分析了滚筒转速对籽粒损伤的影响,SRISON 等[11]研究了脱粒滚筒结构与玉米特性对玉米脱粒损伤和功耗的影响,PETKEVICHIUS 等[12]对玉米果穗喂入方向、含水率、凹板间隙等因素对脱粒损失的影响进行了研究。国内学者在脱粒损伤的研究中也取得一些理论成果[13-15],少数科研院所进行了脱粒新结构的研究。李心平等[16-17]设计了仿鸡喙离散玉米和裸手脱粒的仿生玉米脱粒机,樊晨龙等[18]设计了一种低损伤圆头钉齿与分段组合式圆管型脱粒凹板相配合的脱粒分离装置,邸志峰等[19]设计了纹杆块与钉齿组合式轴流玉米脱粒滚筒,赵武云[20]设计了变径变间距螺旋板齿式玉米脱粒机。上述研究在籽粒收获方面取得了一些阶段性成果,但主要集中在低含水率或高含水率果穗脱粒技术及小型脱粒装置的研究上,针对黄淮海地区较高含水率玉米籽粒直收特点的大型脱粒分离装置的研究仍然处于初期阶段,有待深入研究。

为解决较高含水率果穗籽粒直收过程中脱粒装置造成的籽粒破碎率和未脱净率高、苞叶和芯轴等杂余易堵塞凹板等问题,本文设计一种“柔性钉齿 + 双扭簧压力短纹杆”组合式脱粒元件和“六棱孔网格筛 + 鱼鳞式脱粒橡胶辊”组合式脱粒凹板相配合的柔性脱粒分离装置,并搭建脱粒试验台,通过单因素试验和多因素正交试验分析影响籽粒破碎率和未脱净率的因素,以期为黄淮海地区籽粒直收技术研究提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

纵轴流辊式组合玉米柔性脱粒分离装置整体结构如图 1 所示,主要由锥形脱粒滚筒、锥形上罩、辊式组合脱粒凹板、倾角调节机构、进料口、外壳、机架、电动机等组成。其中锥形上罩下表面设有螺旋导流板;锥形脱粒滚筒的圆锥表面螺旋布置“柔性钉齿 + 双扭簧压力短纹杆”组合式脱粒元件,尾部设有排杂板;辊式组合脱粒凹板取代了传统凹板形式,由“六棱孔网格筛 + 鱼鳞式脱粒橡胶辊”组成,

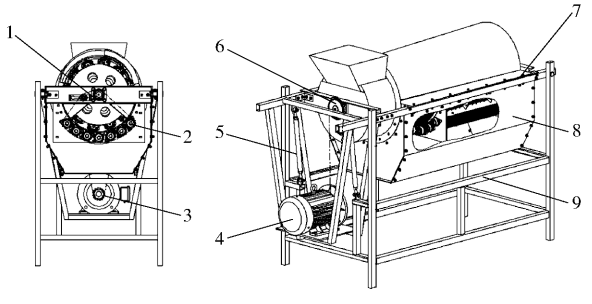


图 1 纵轴流辊式组合玉米柔性脱粒分离装置总体结构简图

Fig. 1 Structure diagram of roller-type combined longitudinal axial flow flexible corn threshing and separating device

1. 滚筒后传动链轮 2. 脱粒辊传动链轮 3. 电动机传动链轮 4. 电动机 5. 倾角调节装置 6. 滚筒前传动链轮 7. 支撑架 8. 柔性脱粒分离装置 9. 机架

可实现分段式柔性脱粒分离，并与锥形脱粒滚筒安装于外壳与锥形上罩组成的锥形脱粒空间内，设置在机架上方；其中鱼鳞式脱粒橡胶辊与脱粒滚筒转向相同，实现反向相切差速运动；在滚筒前端设置倾角调节机构。

1.2　工作原理

纵轴流辊式组合玉米柔性脱粒分离装置采用径向喂入、籽粒径向排出、苞叶和芯轴等杂余轴向排出的脱粒工艺。工作过程主要由果穗喂入、初步脱粒、再次脱粒、分离和排杂 5 个阶段组成。工作时，玉米果穗经进料口进入工作区域，在螺旋喂入头的强制作用下进入锥形脱粒空间内，完成果穗喂入过程；果穗随导流板螺旋向后运动，并在滚筒脱粒元件和辊式组合脱粒凹板的击打、碰撞、揉搓作用下开始初步脱粒；此区域内脱粒间隙最大，脱粒元件为球形头式钉齿，且呈“前高后低”方式排布，凹板为六棱孔网格筛，有效减少物料与凹板间的摩擦，减少果穗的机械损伤；果穗继续向后运动，脱粒间隙逐渐变小，未脱净的芯轴受到双扭簧压力短纹杆和鱼鳞式脱粒橡胶辊的循环反向挤搓和摩擦作用，完成其余籽粒的再次脱粒；脱粒过程中，已脱下的玉米籽粒透过辊式组合脱粒凹板与芯轴、苞叶等分离，完成分离过程；在滚筒末端，脱净后的杂余随排杂板被排出机外，进行排杂，从而实现整个脱粒过程。

2　关键部件设计

2.1　“柔性钉齿 + 双扭簧压力短纹杆”组合式脱粒元件

锥形脱粒滚筒按主要功能划分为喂入部分、脱粒部分、分离部分和排杂部分。锥形脱粒滚筒采用课题组前期搭建的“栅格凹板 + 锥形脱粒滚筒”试验台架。

在前期研究的基础上，根据脱粒过程中脱粒作用的不同需求，本文设计了“柔性钉齿 + 双扭簧压力纹杆”组合式脱粒元件，滚筒前段果穗完整饱满，需要靠钉齿的冲击进行脱粒，但籽粒破碎率高，因此设置球头式柔性钉齿，脱粒作用相对柔和，尽可能降低脱粒元件对籽粒的击打损伤，钉齿的打击和梳理作用可有效提高喂入初始脱粒元件对完整果穗的脱粒能力，较强的抓取能力能够带动果穗的螺旋输送；滚筒后段芯轴上籽粒相对较少，可依靠搓擦作用实现柔性脱粒，因此设置双扭簧压力纹杆，利用搓擦作用对未脱净的果穗进行脱粒，双扭簧弹性结构可降低对籽粒的机械损伤，双扭簧压力短纹杆的搅动能力有利于脱粒后籽粒和杂质分离；尾端布设排杂板，增强尾端杂物的排出能力。锥形螺旋喂入头小端直径 200 mm，大端直径 350 mm，螺旋输送器长度 280 mm，螺旋头数为 2，螺旋喂入角 6°；锥形脱粒滚体小端直径 350 mm，大端直径 496 mm，滚体锥角为 6°，滚体长度 1 390 mm。组合式脱粒元件采用等角圆锥螺旋线排列[21-22]，螺旋头数选择为 4。滚筒结构如图 2 所示。

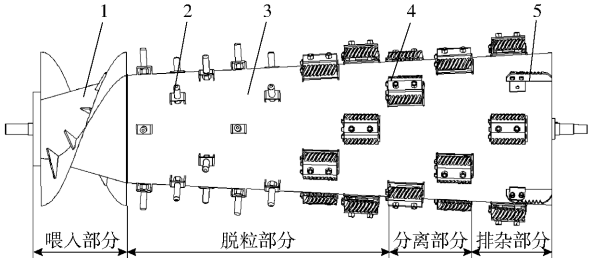


图 2　锥形脱粒滚筒结构图

Fig. 2　Structural diagram of conical threshing cylinder

1. 锥形螺旋喂入头　2. 柔性钉齿　3. 锥形脱粒滚体　4. 双扭簧压力短纹杆　5. 排杂板

2.1.1　柔性钉齿

为了降低脱粒损伤，实现柔性脱粒，设计球头式柔性钉齿，采用聚氨酯橡胶材料制造。根据对球头钉齿与果穗理论碰撞研究可知，球头半径 R 计算式为[23]

$$R \geqslant \frac{2b + \pi h}{2\pi} \tag{1}$$

式中　b——梯形杆齿厚度，取 12 mm

h——果穗与圆头钉齿接触时的压缩量，取 1 mm

由式(1)得 $R \geqslant 5$ mm，本文设计球头脱粒钉齿直径为 12 mm，为了适应锥型滚筒脱粒间隙变化，钉齿设计不同高度，采用“前高后低”方式排布，并与脱粒纹杆按 4 头螺旋排列。球头脱粒钉齿高度设计为 85、80 mm。

2.1.2　双扭簧压力短纹杆

脱粒元件的刚性冲击是造成籽粒损伤的主要因素，本文采用释放破坏性脱粒外力的设计理念，设计了双扭簧压力短纹杆，主要由左旋短纹杆、扭压簧、支旋螺栓和底座等组成，如图 3 所示。图中 $\Delta\varphi$ 为扭簧扭转范围；φ_1 为扭转角；F_1、F_2 分别为双扭簧压力短纹杆脱粒外力；h_1、h_2 分别为短纹杆到右侧扭压簧的作用距离；ω 为双扭簧压力短纹杆角速度。两左旋短纹杆通过与销轴套焊接固定的支旋螺栓对称安装于底座，可实现销轴套在销轴中的转动，同时通过支旋螺栓带动双短纹杆的圆弧摆动。在两侧左旋短纹杆下方设置预紧扭压簧，当脱粒过程中短纹杆与果穗产生刚性冲击时，通过扭压簧扭转吸收瞬间高强冲击力，确保脱粒外力强度在安全阈值内，以减少对籽粒的机械损伤。

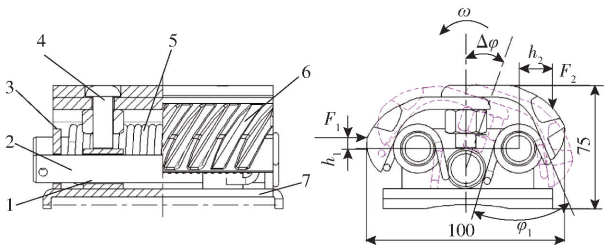


图 3 双扭簧压力纹杆结构图

Fig. 3 Structural diagram of double torsion spring pressure rasp bar

1. 销轴套 2. 销轴 3. 定位轴套 4. 支旋螺栓 5. 扭压簧 6. 左旋短纹杆 7. 底座

工作时,左侧扭压簧起限位与支撑作用,右侧扭压簧承受主要脱粒扭矩。为避免芯轴断裂,施加外力应低于 610 N,且一般籽粒连接强度不低于 10 N[24]。根据文献[24],当果穗对纹杆作用力(40 N)大于籽粒脱落力小于籽粒破碎时破坏力和果穗断裂力,扭簧即可发生扭转,以缓解脱粒元件对果穗的刚性冲击,考虑到研究的玉米籽粒含水率较参考文献低,脱粒作用力下降明显[25],因此,设定双扭簧压力短纹杆脱粒外力 F_1、F_2 均为 36 N,到右侧扭簧的作用距离分别为 $h_1=5.5$ mm,$h_2=16.5$ mm,则右侧扭压簧预设扭矩 $T_1=F_1h_1+F_2h_2$,以扭转角 $\varphi_1=40°$ 安装,扭转范围 $\Delta\varphi=20°$,最大扭矩为 $T_n=T_1(\varphi_1+\Delta\varphi)/\varphi_1$。

选用 C 级碳素弹簧钢丝,初定扭簧旋绕比 C 为 6,直径 d_G 为[26]

$$d_G=\sqrt[3]{\frac{32T_nK}{0.8\pi\delta_b}} \tag{2}$$

式中 d_G——钢丝直径,取 3.5 mm

K——扭簧曲度系数,取 1.15

δ_b——抗拉极限强度,取 1 570 MPa

则扭簧实际所需工作圈数为

$$n=\frac{Ed^4\Delta\varphi}{3\,667D_T(T_n-T_1)} \tag{3}$$

其中
$$D_T=Cd_G \tag{4}$$

式中 E——弹性模量,取 2.06×10^5 MPa

D_T——弹簧中径,取 21 mm

综上可得 $n=25$。

2.2 辊式组合脱粒凹板

2.2.1 结构参数设计

在脱粒过程中,常规凹板横隔板顶端的棱角易与果穗发生碰撞,造成玉米籽粒损伤,且易阻滞果穗螺旋导送运动,苞叶及芯轴等杂物经常堵塞凹板。针对上述问题,本文设计了一种辊式组合脱粒凹板,前段设置六棱孔网格筛,后段设置 7 组鱼鳞式脱粒橡胶辊圆周阵列,并与对称布置的栅条凹板形成 180°包角,栅条凹板以短弧形筋条代替横隔板,结构如图 4 所示。六棱孔网格筛区别于传统冲孔式凹板筛,将果穗与圆孔圆弧点式接触,优化为与棱边线式接触,减少钉齿瞬间冲击果穗造成的机械损伤,设计六棱孔内切圆直径为 20 mm,凹板直径为 640 mm,筛孔率达 42.5%。脱粒后期,橡胶辊与纹杆的反向搓擦作用能降低果穗碰撞强度、有效脱净剩余籽粒,橡胶辊的转动还可促进籽粒与苞叶、芯轴有效分离及排出,减少夹带损失。前后段与物料接触形成的圆弧面持平,避免物料输送过程中出现阻滞。

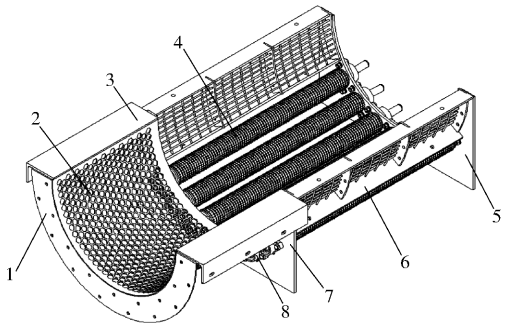


图 4 辊式组合脱粒凹板结构简图

Fig. 4 Schematic of roller-type combined threshing concave

1. 前固定板 2. 六棱孔网格筛 3. 侧固定板 4. 鱼鳞式脱粒橡胶辊组合 5. 后连接板 6. 栅条式凹板 7. 前连接板 8. 轴承座

脱粒橡胶辊组合安装如图 5 所示。为使果穗与橡胶辊充分接触并筛分,且确保芯轴等杂余不从两辊间漏掉,凹板间隙一般选取 8~15 mm[27-28],设计橡胶辊上接触表面形成的圆弧半径 R_1 为 320 mm,相邻两辊夹角 $\theta_1=15°$。由图 5 可知,两橡胶辊之间的间隙为

$$L_1=\frac{\pi R_2\theta_1}{180°}-d \tag{5}$$

其中
$$R_2=R_1+d/2 \tag{6}$$

式中 R_2——橡胶辊安装圆弧半径,mm

d——脱粒橡胶辊直径,mm

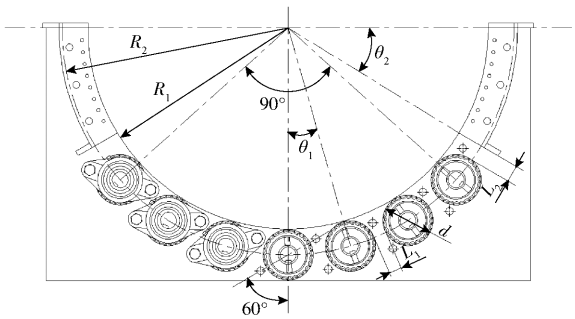


图 5 鱼鳞式脱粒橡胶辊组合安装示意图

Fig. 5 Installation diagram of fish scale threshing rubber roller combination

若满足 8 mm≤L_1≤15 mm,则由式(5)、(6)可得

79.1 mm≤d≤87.2 mm

因此，选择脱粒橡胶辊直径为 80 mm，此时橡胶辊安装圆弧半径为 360 mm，由式(5)可得 L_1 = 14.2 mm，符合脱粒分离设计要求。

橡胶辊与栅条式凹板间隙 L_2 为

$$L_2 = \frac{\pi R_2(90° - \theta_2 - 3\theta_1)}{180°} - \frac{d}{2} \tag{7}$$

式中　θ_2——栅条凹板包角，设定为 36.5°

由式(7)可得 L_2 = 13.4 mm。

综合上述设计，锥形脱粒滚筒前端与六棱孔网格筛的脱粒间隙为 60 mm，后端与橡胶辊的脱粒间隙为 30 mm。脱粒间隙呈前大后小趋势，如图 6 所示，前端大间隙利于果穗喂入，间隙逐渐减小，果穗受到搓擦和挤压的作用增强。考虑到不同玉米品种、喂入量、果穗直径和含水率对脱粒间隙的要求，本试验台通过调整辊式组合脱粒凹板两侧的螺栓位置来调节脱粒间隙。

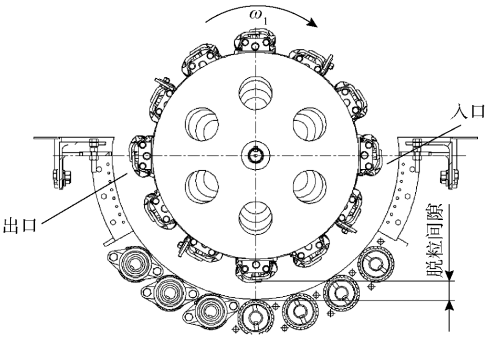


图 6　脱粒滚筒与辊式组合脱粒凹板配置示意图

Fig. 6　Schematic of relationship between roller and roller-type combined threshing concave

2.2.2　脱粒橡胶辊运动分析

脱粒橡胶辊与脱粒元件的反向相切差速运动使果穗受挤搓作用的同时发生翻转，确保脱粒充分。因此，对脱粒后期果穗的运动进行简化分析，如图 7 所示。假设果穗与锥形脱粒滚筒和脱粒辊之间进行纯滚动，不发生打滑现象。脱粒滚筒与脱粒橡胶辊分别以角速度 ω_1、ω_2 同向旋转，任一时刻，果穗绕瞬心 C 做角速度为 ω_0 的旋转运动，以及速度为 v_0 的切向运动。果穗表面上一点产生绕果穗瞬心的翻转角为 φ。则有

$$\begin{cases} v_a = \omega_1 R_a \\ v_b = \omega_2 R_b \\ v_0 = \omega_0 L_{OC} \end{cases} \tag{8}$$

式中　R_a——脱粒元件到滚筒中心半径，mm

R_b——脱粒橡胶辊半径，mm

L_{OC}——瞬心 C 到果穗中心距离，mm

v_a——脱粒滚筒与果穗接触点 A 线速度，m/s

v_b——橡胶辊与果穗接触点 B 线速度，m/s

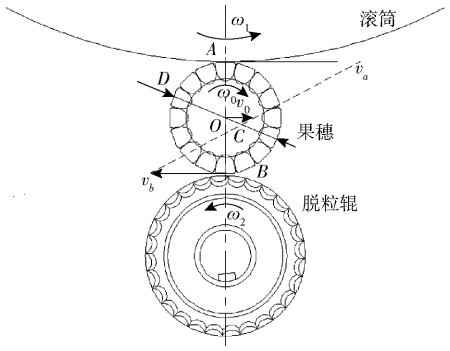


图 7　脱粒过程果穗运动分析

Fig. 7　Motion analysis of ear threshing course

由于锥形脱粒滚筒相对切线转速属于变量，难以直接测量计算，因此设定脱粒滚筒与脱粒橡胶辊的传动比(辊筒传动比)i(i>1)，通过改变辊筒传动比实现相对速度的调整。则有

$$\Delta v = \frac{1}{30\,000}\pi n_1 \left(R_a - \frac{R_b}{i}\right) \tag{9}$$

式中　Δv——相对切线速度差，m/s

n_1——滚筒转速，r/min

由三角形相似定理得

$$\begin{cases} \dfrac{L_{AC}}{L_{BA}} = \dfrac{v_a}{v_b} \\ L_{AC} + L_{BC} = D \\ L_{OC} = L_{AC} - \dfrac{D}{2} \end{cases} \tag{10}$$

式中　L_{AC}——瞬心 C 到脱粒元件距离，mm

L_{BC}——瞬心 C 到脱粒辊距离，mm

L_{BA}——接触点 A 与接触点 B 之间的距离，mm

果穗旋转角 φ 和果穗绕脱粒装置运动的弧长 S 为

$$\begin{cases} \varphi = \omega_0 t \\ S = v_0 t \end{cases} \tag{11}$$

式中　t——脱粒时间，s

由式(10)、(11)可得

$$\varphi = \frac{S}{D\left(\dfrac{1}{1 + \dfrac{R_b}{iR_a}} - \dfrac{1}{2}\right)} \tag{12}$$

式中　D——果穗直径，mm

可以看出，当辊筒传动比 i 增大时，旋转角 φ 减小，因此应适当减小传动比 i，确保果穗在底部停留足够时间，增大果穗转幅，促进脱粒分离充分。

3　脱粒性能试验

3.1　试验因素

研究发现，脱粒过程中影响玉米籽粒破碎的因素有籽粒含水率、滚筒转速、脱粒间隙和喂入量等[29]，选择自然脱水状态下含水率在 26% ~28% 的

玉米进行脱粒试验。根据试验地区脱粒作业的实际情况,确定试验台的喂入量为 6 kg/s。通过对脱粒橡胶辊的运动分析发现,脱粒滚筒与橡胶辊的相对切线速度差对脱粒作业也有较大影响,为便于计算,选定辊筒传动比进行替代。因此最终选择滚筒转速、脱粒间隙和辊筒传动比为试验因素。

滚筒转速过高,脱粒元件对籽粒损伤大,而滚筒转速过低,又不能脱净果穗。结合课题组前期对“栅格凹板 + 锥形脱粒滚筒”试验台架研究,滚筒转速取 350、400、450、500、550 r/min。籽粒主要靠脱粒元件和辊式组合脱粒凹板的共同作用与芯轴分离,脱粒间隙对脱粒性能有直接影响。采用的锥形脱粒滚筒,脱粒间隙自入口逐渐减小,试验选取平均间隙进行研究。综合选定的玉米品种,脱粒间隙重点考察 40、45、50、55、60 mm 对脱粒性能的影响。为使脱粒滚筒和橡胶辊产生挤搓作用,且果穗能够翻转,确保脱粒充分,根据对脱粒橡胶辊 EDEM 运动仿真试验的结果,确定辊筒传动比范围为 1 ~ 2,分别取 1、1.25、1.5、1.75、2。

3.2 试验材料与条件

选用山东地区广泛种植的“郑单 958”玉米果穗,其基本特征参数如表 1 所示。2019 年 9 月在山东国丰机械有限公司进行了脱粒性能试验,纵轴流辊式组合玉米柔性脱粒分离装置试验台及主要部件实物如图 8 所示。

表 1 试验玉米基本特征参数

Tab. 1 Corn parameters in experiment

参数	数值
平均穗长/mm	171.67
平均大端直径/mm	52.1
平均小端直径/mm	42
籽粒含水率/%	26 ~ 28



(a) 脱粒试验台整机 (b) 辊式组合脱粒凹板 (c) 锥形脱粒滚筒

图 8 脱粒试验台及主要部件实物图

Fig. 8 Pictures of threshing test bed and main parts

为确保锥形脱粒滚筒运转稳定,采用 YYW - 300 型硬支撑动平衡机按照国家标准[30]对锥形脱粒滚筒进行动平衡校核,并进行配重复检以达到国家标准要求。收获过程中,割台摘穗会影响果穗完整,因此,采用人工摘穗的方式收集果穗,保留 3 或 4 层果穗苞叶。每组试验重复 3 次,取平均值作为试验结果。

3.3 试验方法

纵轴流辊式组合玉米柔性脱粒分离装置试验台旨在考察脱粒性能,因此,根据 GB/T 21961—2008《玉米收获机械 试验方法》和 GB/T 21962—2008《玉米收获机械 技术条件》选择籽粒破碎率 Z_s、未脱净率 S_w 为试验评价指标,计算式为

$$Z_s = \frac{W_s}{W_i} \times 100\% \tag{13}$$

$$S_w = \frac{W_j}{W_z} \times 100\% \tag{14}$$

式中 W_s——样品中破碎籽粒质量,包括机器损伤、明显裂纹和破皮的籽粒,g

W_i——取样籽粒总质量,每次取样不少于 2 500 g籽粒,g

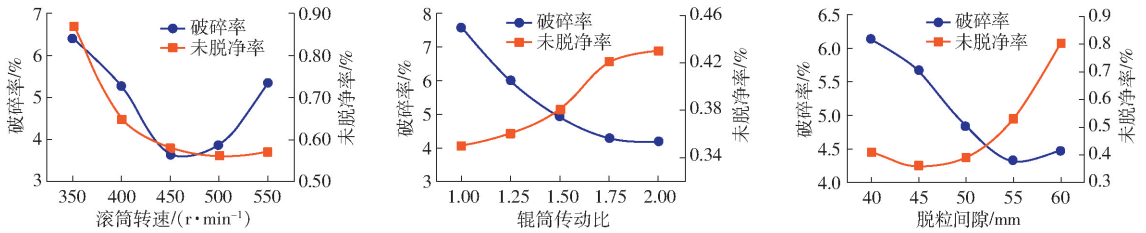
W_j——未脱净籽粒质量,脱粒滚筒中、排杂口及未脱净芯轴上全部籽粒质量,g

W_z——脱出籽粒总质量,出粮口籽粒、飞溅的籽粒以及未脱净籽粒总和,g

3.4 单因素试验

图 9 为滚筒转速、辊筒传动比和脱粒间隙对脱粒性能的影响。由图 9a 可知,随滚筒转速的增加,籽粒破碎率先下降后上升,450 r/min 时达到最低值,未脱净率迅速下降后趋于平稳。滚筒转速较低时,果穗轴向输送缓慢,果穗与脱粒元件长时间碰撞、搓擦造成籽粒损伤严重,此时,脱粒元件的脱粒能力较弱,导致未脱净率较高。随滚筒转速增加时,脱粒能力增加。但当滚筒转速过高时,脱粒元件对果穗的击打、碰撞、搓擦等作用强度与频率不断增加,籽粒破碎严重。滚筒转速在 450 ~ 500 r/min 范围内,脱粒性能最好,籽粒破碎率低于 4%,未脱净率低于 0.6%。

如图 9b 所示,随辊筒传动比的增加,籽粒破碎率逐渐降低并趋于平稳,而未脱净率呈现上升趋势。辊筒传动比较小时,脱粒辊转速较高,果穗被不断弹起且大幅度翻转,受到脱粒滚筒和脱粒辊强烈的冲



(a) 辊筒传动比1.5，脱粒间隙50 mm　(b) 滚筒转速450 r/min，脱粒间隙50 mm　(c) 滚筒转速450 r/min，辊筒传动比1.5

图 9　不同因素对脱粒性能的影响

Fig. 9　Effect of different factors on threshing performance

击与搓擦作用后，脱粒效果好但籽粒破碎率非常高。辊筒传动比较大时，脱粒辊转速较低，果穗翻转运动减弱，果穗圆周运动受到脱粒辊阻滞减小，果穗未能完全脱净就被排出，未脱净率逐渐增加。综合考虑，滚筒传动比在 1.25 ~ 1.75 范围内，籽粒破碎率低于 6%，未脱净率低于 0.42%。

由图 9c 可知，随着脱粒间隙的增加，籽粒破碎率呈下降趋势，未脱净率整体呈上升趋势。脱粒间隙较小时，果穗间的挤压和揉搓作用造成了籽粒破碎，且芯轴易破碎，使得脱粒元件对果穗的脱粒效果降低。脱粒间隙增加后，果穗受到脱粒元件的作用减弱，籽粒破碎率降低，果穗间相互挤搓作用减弱，未脱净率增加。脱粒间隙在 45 ~ 55 mm 范围时，未脱净率和籽粒破碎率分别出现最低值 0.36%、4.32%，脱粒性能最佳。

3.5　正交试验

通过分析滚筒转速、辊筒传动比和脱粒间隙对脱粒性能影响的单因素试验，得到脱粒性能较好时各因素的合理变化范围：滚筒转速 450 ~ 500 r/min、辊筒传动比 1.25 ~ 1.75、脱粒间隙 40 ~ 50 mm，在此基础上，设计三因素三水平正交试验，选择正交表 $L^9(3^4)$ 进行试验[31]，每组试验重复 3 次，因素水平设计见表 2，试验方案与结果见表 3，A、B、C 为因素水平值。

表 2　正交试验因素水平

Tab. 2　Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素		
	滚筒转速 n_1/(r·min^{-1})	辊筒传动比 i	脱粒间隙 δ/mm
1	450	1.25	40
2	475	1.50	45
3	500	1.75	50

由表 3 可知，滚筒转速、辊筒传动比、脱粒间隙对脱粒性能均有不同程度影响，为进一步分析各因素对评价指标影响的显著性，利用 SPSS 22.0 软件在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下，对各因素进行 F 检验[32]，方差分析如表 4 所示。

表 3　试验设计与结果

Tab. 3　Test scheme and results

序号		因素				Z_s/%	S_w/%
		A	B	C	空列		
1		1	1	1	1	4.08	0.45
2		1	2	2	2	3.95	0.64
3		1	3	3	3	3.82	0.68
4		2	1	2	3	3.55	0.39
5		2	2	3	1	3.26	0.48
6		2	3	1	2	3.42	0.42
7		3	1	3	2	3.71	0.45
8		3	2	1	3	3.70	0.37
9		3	3	2	1	3.66	0.59
Z_s	K_1	11.85	11.34	11.20			
	K_2	10.23	10.91	11.16			
	K_3	11.07	10.90	10.79			
	R	1.62	0.44	0.41			
	主次顺序		A、B、C				
	优化组合		$A_2B_3C_3$				
S_w	K_1	1.76	1.29	1.24			
	K_2	1.29	1.48	1.62			
	K_3	1.41	1.69	1.61			
	R	0.47	0.40	0.38			
	主次顺序		A、B、C				
	优化组合		$A_2B_1C_1$				

表 4　方差分析

Tab. 4　Variance analysis result

指标	方差源	自由度	平方和	F	P
Z_s	A	2	0.438	345.474	0.003
	B	2	0.042	33.211	0.029
	C	2	0.034	26.895	0.036
	误差	2	0.001		
S_w	A	2	0.042	32.842	0.030
	B	2	0.027	21.053	0.045
	C	2	0.031	24.684	0.039
	误差	2	0.001		

注：$P < 0.01$ 为极显著，$0.01 < P < 0.05$ 为显著。

结果表明，在 95% 置信度下，滚筒转速对籽粒破碎率影响极显著，辊筒传动比、脱粒间隙对籽粒破碎率影响显著；滚筒转速、辊筒传动比、脱粒间隙对未脱净率影响显著。对破碎率和未脱净率影响由

大到小均为 A、B、C,最优组合分别为 $A_2B_3C_3$ 和 $A_2B_1C_1$。除滚筒转速外,辊筒传动比和脱粒间隙对脱粒性能影响的趋势相反,综合考虑,确定最优参数组合 $A_2B_2C_2$,即滚筒转速 475 r/min,辊筒传动比 1.5,脱粒间隙 45 mm。在该组合下进行试验,重复 5 次取平均值,结果得籽粒破碎率为 3.76%,未脱净率为 0.52%,满足玉米脱粒的相关国家标准要求。

4 结论

(1)设计了一种辊式组合脱粒凹板,采用"六棱孔网格筛 + 鱼鳞式脱粒橡胶辊"结构,配合"柔性钉齿 + 双扭簧压力短纹杆"组合式脱粒元件,可实现分段式柔性脱粒,能够满足黄淮海地区较高含水率玉米籽粒直收的作业要求。

(2)进行了滚筒转速、辊筒传动比、脱粒间隙对脱粒性能影响的单因素试验,得到脱粒性能较好时各因素合理变化范围:滚筒转速为 450 ~ 500 r/min,辊筒传动比为 1.25 ~ 1.75,脱粒间隙为 45 ~ 55 mm,且辊筒传动比和脱粒间隙对籽粒破碎率和未脱净率影响趋势相反。

(3)通过三因素三水平正交试验确定影响籽粒破碎率和未脱净率的主次因素由大到小均为滚筒转速、辊筒传动比、脱粒间隙;确定了最优参数组合为滚筒转速 475 r/min、辊筒传动比 1.5、脱粒间隙 45 mm,此时籽粒破碎率为 3.76%,未脱净率为 0.52%。验证试验表明,在此参数组合下,籽粒含水率在 26% ~ 28% 范围内,试验台脱粒性能较好。

参 考 文 献

[1] 崔涛,樊晨龙,张东兴,等. 玉米机械化收获技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(12):1 - 13.
CUI Tao, FAN Chenlong, ZHANG Dongxing, et al. Research progress of maize mechanized harvesting technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 1 - 13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20191201&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.001. (in Chinese)

[2] 张传根. 玉米籽粒收获机清选筛体结构的优化研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2016.
ZHANG Chuan'gen. Structural optimization of the cleaning screen for maize grain harvester[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[3] 耿爱军,杨建宁,张兆磊,等. 国内外玉米收获机械发展现状及展望[J]. 农机化研究,2016,38(4):251 - 257.
GENG Aijun, YANG Jianning, ZHANG Zhaolei, et al. Discuss about the current situation and future of corn harvest machinery about domestic and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(4): 251 - 257. (in Chinese)

[4] 雷晓鸥. 黄淮海地区玉米机械收获籽粒可行性研究[D]. 保定:河北农业大学,2015.
LEI Xiaoou. Studies on the feasibility of maize mechanically harvesting grain in Huanghuaihai regions[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[5] 刘继元,崔中凯,马继春,等. 黄淮海地区小麦玉米接茬轮作机械化生产问题与对策[J]. 农机化研究,2016,38(5):259 - 263.
LIU Jiyuan, CUI Zhongkai, MA Jichun, et al. Problems and countermeasures of wheat corn rotation production mechanization for main crops in Huanghuaihai region[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(5): 259 - 263. (in Chinese)

[6] 谢瑞芝,雷晓鹏,王克如,等. 黄淮海夏玉米籽粒机械收获研究初报[J]. 作物杂志,2014(2):76 - 79.
XIE Ruizhi, LEI Xiaopeng, WANG Keru, et al. Research on corn mechanically harvesting grain quality in Huanghuaihai plain [J]. Crops, 2014(2): 76 - 79. (in Chinese)

[7] 徐立章,李耀明,王成红,等. 切纵流双滚筒联合收获机脱粒分离装置[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):105 - 108.
XU Lizhang, LI Yaoming, WANG Chenghong, et al. A combinational threshing and separating unit of combine harvester with a transverse tangential cylinder and an axial rotor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 105 - 108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx? file_no=20140218&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.018. (in Chinese)

[8] 吕丽华,董志强,王学清,等. 冬小麦晚播、夏玉米晚收增产潜力分析[J]. 华北农学报,2019,34(增刊):36 - 43.

[9] DUANE L, HARRY H, TED O H, et al. Corn kernal damage due to high velocity impact[J]. Transactions of the ASAE, 1972, 12(1): 330 - 331.

[10] BURKHARDT T H, STOUT B A. Laboratory investigation of cornshelling utilizing high-velocity impact loading [J]. Transactions of the ASABE, 1974, 17(3): 11 - 14.

[11] SRISON W, CHUAN-UDOM S, SAENGPRACHATANARUG K. Design factors affecting loss and power consumption of an axial flow corn shelling unit[J]. Songklanakarin Journal of Science & Technology, 2016, 38(5): 591 - 598.

[12] PETKEVICHIUS S, SHPOKAS L, KUTZBACH H D. Investigation of the maize ear threshing process [J]. Bio-systems Engineering, 2008, 99(4): 532 - 539.

[13] 李耀明,李洪昌,徐立章,等. 短纹杆板齿式轴流脱粒分离装置性能试验[J]. 农业机械学报,2009,40(7):88 - 92.
LI Yaoming, LI Hongchang, XU Lizhang, et al. Performance test of short-rasp-bar of axial flow threshing and separating unit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 88 - 92. (in Chinese)

[14] 彭煜星,李旭,刘大为,等. 单纵轴流脱粒辊筒的设计与性能试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2016,42(5):554 - 560.
PENG Yuxing, LI Xu, LIU Dawei, et al. Design of performance experiment of a threshing cylinder with longitudinal single axial flow[J]. Journal of Hunan Agricultural University(National Science), 2016, 42(5): 554 - 560. (in Chinese)
[15] 王成红. 切纵流联合收获机脱粒分离装置参数优化与试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2014.
WANG Chenghong. Parameters optimazation and experiment of threshing and separation device in tangential-longitudinal combine[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014. (in Chinese)
[16] 李心平,高连兴. 差速式玉米种子脱粒机的性能试验[J]. 农业工程学报,2009,25(12):102 - 106.
LI Xinping, GAO Lianxing. Performance test on corn thresher with different-speed threshing parts[J]. Transactions of the CASE, 2009, 25(12): 102 - 106. (in Chinese)
[17] 李心平,马义东,金鑫,等. 玉米种子仿生脱粒机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(7):97 - 101.
LI Xinping, MA Yidong, JIN Xin, et al. Design and test of corn seed bionic threshing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 97 - 101. http://www.j-casm.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20150715&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.015. (in Chinese)
[18] 樊晨龙,崔涛,张东兴,等. 低损伤组合式玉米脱粒分离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):113 - 123.
FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of low-damge combined corn threshing and separating device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 113 - 123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract..aspx? file_no=20190413&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.013. (in Chinese)
[19] 邸志峰,崔中凯,张华,等. 纹杆块与钉齿组合式轴流玉米脱粒滚筒的设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(1):28 - 34.
DI Zhifeng, CUI Zhongkai, ZHANG Hua, et al. Design and experiment of rasp bar and nail tooth combined axial flow corn threshing cylinder[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 28 - 34. (in Chinese)
[20] 赵武云. 组合式螺旋板齿种子玉米脱粒装置研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012.
ZHAO Wuyun. Research on combined type of spiral bar tooth threshing mechanism for seed corn[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
[21] 耿端阳. 新编农业机械学[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
[22] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
[23] 屈哲. 低损伤组合式玉米脱粒分离装置的研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
QU Zhe. Research on combined maize threshing and separating device with low damade[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[24] 耿端阳,何珂,王骞,等. 横轴流式玉米柔性脱粒装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):101 - 108.
GENG Duanyang, HE Ke, WANG Qian, et al. Design and experiment on transverse axial flow flexible threshing device for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 101 - 108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190310&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.010. (in Chinese)
[25] 高连兴,李飞,张新伟,等. 含水率对种子玉米脱粒性能的影响机理[J]. 农业机械学报,2011,42(12):92 - 96,42.
GAO Lianxing, LI Fei, ZHANG Xinwei, et al. Mechanism of moisture content affect on corn seed thresing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 92 - 96, 42. (in Chinese)
[26] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2014.
[27] 周海玲. 玉米果穗物理力学性质研究及脱粒过程仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2013.
ZHOU Hailing. The physical and mechanical property research of corn ears and simulated analysis of corn threshing progress[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
[28] 许大兴. 纵向轴流滚筒的初步分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),1980(1):115 - 131.
[29] 杨立权,王万章,张红梅,等. 切流-横轴流玉米脱粒系统改进设计及台架试验[J]. 农业工程学报,2018,34(1):35 - 43.
YANG Liquan, WANG Wanzhang, ZHANG Hongmei, et al. Improved design and bench test based on tangential flow-transverse axial flow maize threshing system[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 35 - 43. (in Chinese)
[30] GB/T 9239.2—2006　机械振动恒态(刚性)转子平衡品质要求 第2部分:平衡误差[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
[31] 任露泉. 试验设计及其优化[M]. 北京:科学出版社,2009.
[32] 李耀明,陈洋,徐立章,等. 斜置切纵流联合收获机脱粒分离装置结构参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):56 - 61.
LI Yaoming, CHEN Yang, XU Lizhang, et al. Optimization of structural parameters for threshing and separating device in oblique tangential-longitudinal combine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):56 - 61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160909&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:6041/j.issn.1000-1298.2016.09.009. (in Chinese)